

ПОЛУЧЕНИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

^{1,2}Сергеева А. М., ¹Ловизин Н. С., ¹Соснин А. А.

¹Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Комсомольск-на-Амуре, Россия

²ООО «Институт научно-технических инноваций», Комсомольск-на-Амуре, Россия

e-mail: serg-nasty@mail.ru, iamusver@mail.ru, alekshak@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования механических свойств длинномерных профилей прямоугольного сечения из алюминиевого деформируемого сплава Д1 (1110), полученных при реализации новой технологии, совмещающей непрерывное литье металла с одновременной его деформацией в твердотекучем состоянии. Проведенные исследования показали, что данная технология позволяет за короткий производственный цикл получать плоские заготовки прямоугольного сечения со скоростью 2 м/мин. Переработка сплава Д1 (1110) позволяет повысить предел прочности при разрыве на 24,5%, предел текучести – на 43,5%, относительное удлинение – в 2,5 раза, твердость по Бринеллю – на 29% по сравнению со сплавом в состоянии поставки без термической обработки. Показана перспективность данной технологии.

Ключевые слова: Алюминиевые сплавы, непрерывное литье, деформация в твердотекучем состоянии, совмещенные процессы, кристаллизация.

THE OBTAINING OF LONG-LENGTH PROFILES FROM ALUMINUM ALLOYS WITH APPLICATION OF NEW TECHNOLOGY

A. M. Sergeeva^{1,2}, N. S. Lovizin¹, A. A. Sosnin¹

¹Institute of machinery and metallurgy of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia

²“Institute of Scientific and Technical Innovation” Ltd.

serg-nasty@mail.ru, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

e-mail: serg-nasty@mail.ru, iamusver@mail.ru, alekshak@mail.ru

Abstract: The results of the researching of the mechanical properties of longitudinally rectangular sections of an aluminum deformable alloy D1 (1110) are presented, which are obtained by implementing a new technology that combines continuous metal casting with simultaneous deformation in a solid-liquid state. The conducted researches showed that this technology makes it possible to produce flat blanks of rectangular cross section at a speed of 2 m/min in a short production cycle. The processing of alloy D1 (1110) allows to increase the breaking strength by 24.5%, the yield strength by 43.5%, the elongation by 2.5 times, the Brinell hardness by 29% compared to the alloy in the state of delivery without heat treatment. The prospects of this technology were shown.

Keywords: Aluminum alloys, continuous casting, deformation in a solid-liquid state, combined processes, crystallization

1. Введение

Одним из основополагающих принципов разработки перспективных материалов и технологий для строительства, является получение готовых металлоизделий, профилей с высокими характеристиками с минимальными сырьевыми и временными затратами. С целью улучшения качества изделий из металлов разрабатываются технологии,

позволяющие перерабатывать металлы и сплавы в твердожидком состоянии, обеспечивают не только мелкозернистую структуру, но и высокое качество профилей, стабильность и однородность свойств, высокую технологичность [1]. Необходимость разработки таких технологий связана с возможностью использования новых свойств металлов и сплавов, которые они способны проявлять при их деформировании в твердожидком состоянии, а также с возможностью осуществлять сложное формообразование за одну операцию при сниженных энергетических затратах. В основу разработок технологии переработки металлов и сплавов в твердожидком состоянии положен междисциплинарный подход, позволяющий изменять представление о технологических и служебных характеристиках металлов и сплавов и раскрывать их неиспользованный потенциал. Обеспечение высокой плотности зародышей кристаллизации и их равномерное распределение по объему жидкой фазы – обязательное и необходимое условие при разработке технологий работы с металлом в твердожидком состоянии. Управляемое охлаждение способствует возникновению новых зародышей кристаллизации, а также контролирует их выживание при контакте с перегретой жидкой фазой.

В данной работе проводили исследование плоских длинномерных профилей из среднелегированного алюминиевого сплава, полученных по технологии вертикального непрерывного литья, совмещенного с деформацией металла в твердожидком состоянии. Цель данной работы – исследование механических свойств профилей, полученных по предлагаемой технологии и не подвергнутых последующей обработке, а также экспериментальное подтверждение возможности получения длинномерных металлоизделий с повышенными механическими характеристиками за короткий производственный цикл и без дополнительных процедур термообработки.

2. Методы исследования и экспериментальные данные

Исследования проводили с использованием алюминиевого сплава, химический состав которого определяли с помощью энергодисперсионного рентгеновского флуоресцентного спектрометра EDX-8000 фирмы Shimadzu (Япония). Для определения состава сплава в состоянии поставки из пяти его произвольных областей проводили забор материала. В табл. 1 приведен химический состав исследуемого металла, который в соответствии с ГОСТ 4784–97 [2] относится к сплаву Д1.

Таблица 1

Химический состав исследуемого сплава

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)								
	Al	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Zn	Ti	Σ примесей
Д1 (ГОСТ 4784–97)	91,7–95,5	3,5–4,5	0,4–0,8	До 0,7	0,2–0,8	0,4–1,0	До 0,25	До 0,15	До 0,15
Д1 _{иссл}	93,641	4,157	0,521	0,635	0,203	0,458	0,250	0,011	0,124

Устройство, реализующее совмещение технологии непрерывного вертикального литья металлов с одновременной их деформацией в твердожидком состоянии, представлено на рис. 1 [3].

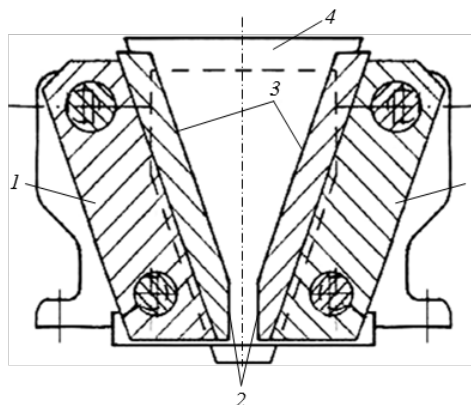


Рис. 1. Схема устройства, реализующего технологию совмещения непрерывного литья металлов вертикального типа с одновременной деформацией сплава в твердожидком состоянии

Основным элементом конструкции является подвижный составной кристаллизатор, состоящий из двух деформирующих и двух боковых стенок. Деформирующие стенки 1, оснащенные системой охлаждения, состоят из вертикального участка 2 и наклонного участка 3. Две боковые стенки 4, обеспечивающие продвижение готовых плоских заготовок вниз, также снабжены системой охлаждения. Деформирующие и боковые стенки ограничивают внутреннюю область кристаллизатора. Организованный подобным образом кристаллизатор переменного сечения с подвижными стенками позволяет в пределах его внутреннего объема оказывать термомеханическое воздействие на кристаллизующийся расплав. Главная функциональная особенность такой конструкции кристаллизатора заключается в интенсификации процессов теплоотвода и массопереноса. Приводные валы с эксцентриковыми втулками приводят в движение деформирующие и боковые стенки. Герметичность стыков между составными частями кристаллизатора обеспечивается неподвижными опорными плитами, которые смыкают деформирующие и боковые стенки друг с другом. Устройство обеспечивает одноручьевого выход профилей вниз под установку. Подробное описание работы устройства изложено в работе [4]. Полученные профили в поперечном сечении имеют форму прямоугольника с размерами 60×10 мм, длина профилей может быть ограничена только глубиной колодца, находящегося под устройством. В имеющейся лабораторной установке глубина колодца равна 2,5 м, поэтому длина исследуемых плоских заготовок равнялась 2 м.

Расплав исследуемого металла подготавливали с помощью индукционной плавильной установки УИП-100-2.4-0.6x2Г до температуры 710°C , согласно рекомендациям, приведенным в работах [5, 6].

Режим работы устройства для получения металлоизделий из сплава Д1 следующий: частота сближения деформирующих стенок 1,33–1,66 Гц; силовое воздействие, циклически оказываемое на формируемое металлоизделие при реализации техпроцесса, 86 МПа; температура подаваемой в систему охлаждения воды 70°C при давлении 0,395 МПа. Внешний вид полученной плоской заготовки представлен на рис. 2.

Наиболее простой и доступный способ определения механических характеристик (прочность и пластичность материала) – это проведение исследований на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84 [9].

Для проведения исследований свойств профилей были взяты образцы материала в соответствии со схемой представленной на рис. 3.

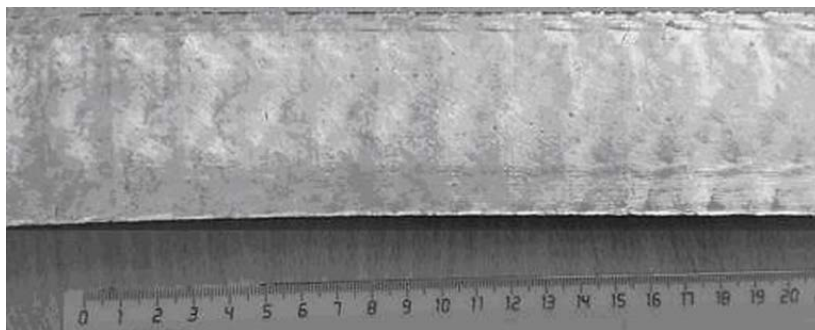


Рис. 2. Внешний вид плоской заготовки из сплава Д1

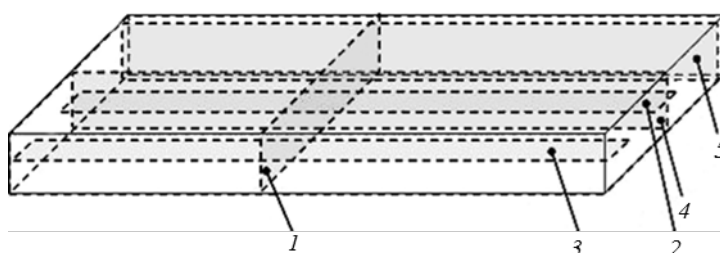


Рис. 3. Схема вырезки образцов, взятых в поперечном (1), продольном (2, 3) и высотном направлениях (4, 5)

3. Результаты

Исследование твердости полученных плоских заготовок проводили по трем направлениям: поперечном, продольном по ширине и высоте заготовки. В каждом направлении подготавливали по три образца, измерение твердости проводили в пяти точках. Для исследования твердости в продольном направлении подготавливали образцы из прикраевой и центральной областей заготовки. В табл. 4 приведены результаты исследований твердости по Бринеллю плоских заготовок из сплава Д1 (диаметры отпечатков и значения твердости в каждой точке не приводили – указаны средние значения твердости по каждому образцу).

Анализируя результаты, приведенные в табл. 4, можно утверждать, что в прикраевых областях плоских заготовок твердость больше, чем в центральной части. В продольном направлении по ширине образца разница значений твердости для центральной и прикраевой областей составляет 6,1 %, а в продольном направлении по высоте образца такая разница достигает 15 %. В поперечном направлении разница в значениях твердости составляет 17,6 %.

Таблица 4

Твердость по Бринеллю (НВ) плоских профилей из сплава Д1

Исследуемое направление	Исследуемая область	НВ _{ср} по направлению (кгс/мм ²)/(МПа)
поперечное	центральная	80,65/791,21
продольное по ширине	центральная	76,02/745,76
	прикраевая (на расстоянии 1мм от края)	84,82/832,12
продольное по высоте	центральная	72,50/711,24
	прикраевая (на расстоянии 1мм от края)	83,98/823,80

Повышение твердости в прикраевых областях связано с интенсификацией процессов охлаждения, которые реализуются в данной технологии. В зоне контакта расплава со стенками кристаллизатора происходил интенсивный теплоотвод, что привело к возникновению активных первичных зародышей кристаллизации. Результатом охлаждающего воздействия явился переход расплава в твердожидкое состояние. Механизм зарождения большого количества центров кристаллизации при интенсивном охлаждении расплава подробно рассмотрен в работе [10]. Деформирующие стенки кристаллизатора в процессе работы устройства обеспечивали механическое перемешивание твердожидкого расплава, интенсифицируя процесс массопереноса, а также лавинообразный рост вторичных центров кристаллизации. В контактной зоне формировалась так называемая «корочка», возникновение которой обусловлено отставанием диффузионных процессов от фазовых переходов. В зоне контакта расплава с подвижными стенками кристаллизатора реализовывалось интенсивное охлаждение, формировалась твердая фаза и осуществлялось скопление примесей у границ раздела фаз, которые препятствовали перемешиванию диффузионных слоев, – таким образом происходило формирование «корочки», которая вследствие циклического движения стенок кристаллизатора претерпевала многократные термические и механические деформации, поэтому материал прикраевой области приобрел механические свойства, отличающиеся от свойств материала центральной части заготовки.

Для проведения исследований механических свойств плоских заготовок подготавливали пять групп образцов – по три в каждой группе из различных областей заготовок – в соответствии с рис. 3. Образцы, взятые в продольном направлении по ширине металлоизделия, выполнены в форме пластины, имели следующие геометрические размеры рабочей области (толщина×длина×ширина): 2×33×8 мм. Образцы, взятые в поперечном направлении, выполнены в форме пластины размером 2×30×6 мм. Образцы, взятые в продольном направлении по высоте металлоизделия, выполнены в форме пластины размером 2×25×5 мм.

Исследования образцов на растяжение проводили с использованием напольной универсальной испытательной машины для определения механических характеристик AG-250kNX фирмы Shimadzu (Япония). Скорость растяжения образцов устанавливали 0,01 мм/с, поэтому можно считать, что растяжение было квазистатическим, испытания проводили при комнатной температуре (20°C).

Результаты исследований на растяжение образцов, вырезанных из плоских заготовок в трех направлениях, указанных на рис. 3, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Механические свойства образцов, вырезанных в трех направлениях из плоских профилей из сплава Д1

Исследуемое направление	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ _{ср} (кгс/мм ²)	НВ* (МПа)
поперечное	225	142	24	81	791
продольное по ширине	237	169	24	76	746
продольное по высоте	239	154	29	73	711

Полученные результаты механических свойств плоских профилей из сплава Д1 согласуются с результатами проведенных исследований твердости по Бринеллю. Из данных табл. 4 и 5 видно, что в полученных заготовках имеет место краевой эффект. В

прикраевой области материал более прочный и твердый, но обладает меньшей пластичностью в сравнении с материалом центральной части профилей.

Полученные результаты показывают, что рассматриваемая технология влияет на изменение механических свойств сплава Д1. Полученные плоские заготовки приобрели повышенные механические свойства: $\sigma_b \approx 240$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 155$ МПа, $\delta \approx 25\%$, НВ ≈ 781 МПа. Технология совмещения непрерывного литья металлов с одновременной их деформацией в твердожидком состоянии позволила за короткий производственный цикл, длящийся всего 1 мин, получить 2 м заготовки и при этом (без дополнительных процедур последующей обработки) увеличить предел прочности при растяжении на 24,5 %, предел текучести – на 43,5 %, относительное удлинение – в 2,5 раза, твердость по Бринеллю – на 29 %.

Процесс деформирования – как результат данной технологии – способствует повышению механических характеристик, требует минимальных силовых затрат, так как в нем не предполагается дополнительно разогревать материал, а используется собственное тепло остывающего металла. Полученные результаты полностью согласуются с результатами исследований, изложенных в работах [3, 10].

Рассматриваемая технология позволяет получать профили с улучшенными механическими свойствами со скоростью 2–6 м/мин. Скорость получения заготовок и процент повышения механических свойств зависят от выбранного режима работы устройства и заливаемого в устройство расплава. Технологии совмещения непрерывного литья металлов с одновременной их деформацией в твердожидком состоянии, безусловно, можно отнести к перспективным и энергоэффективным, которым в последние годы уделяется особое внимание [11]. Такие технологии не только позволяют сокращать производственный цикл, но способствуют повышению качества металлоизделий в процессе формообразования, а также могут рассматриваться как основополагающие для разработки техпроцессов по управлению качеством металлических изделий в процессе их формообразования и быть предметом дальнейших исследований.

4. Заключение

Полученные профили имеют повышенные значения механических свойств: σ_b – на 24,5 %, $\sigma_{0,2}$ – на 43,5 %, НВ – на 29 %, δ – в 2,5 раза. В полученных плоских профилях имеет место анизотропия, в большей степени выраженная в краевых областях, что объясняется физическими особенностями процессов, реализуемых в данной технологии.

Рассмотренную технологию можно отнести к энергоэффективным, так как получение длинномерных плоских профилей с улучшенными характеристиками осуществляется за короткий производственный цикл и без дополнительных процедур подогрева материала благодаря использованию собственного тепла металла. Полученные по данной технологии профили имеют улучшенные механические свойства сразу по выходе из кристаллизатора и не требуют последующей термической обработки.

В данной работе показано, что формообразование на базе совмещения нескольких технологических процессов позволяет повышать механические свойства сплава за короткий временной промежуток и получать длинномерные металлоизделия прямоугольного и сложного сечений. Такая технология может применяться для получения полуфабрикатов из технически чистого алюминия, слабо- и среднелегированных алюминиевых сплавов. В отношении высоколегированных, плохо деформируемых

сплавов данный принцип формообразования может быть основополагающим для разработки перспективных технологий, а также применяться как отдельный этап технологического процесса получения длинномерных изделий сложного сечения. Данная технология применима для получения новых материалов: композитов с высокой прочностью и пластичностью, биметаллических материалов, армированных и модифицированных материалов. Полученные результаты могут стать основой для разработки инновационных технологий формообразования из металлов в твердожидком состоянии, а также могут быть предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 223 с.
2. ГОСТ 4784–97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Изд-во стандартов, 1997. 10 с.
3. Сергеева А.М., Ловизин Н.С., Соснин А.А. Технология совмещения вертикального непрерывного литья алюминиевых сплавов с одновременной их деформацией// *Металлург* 2018 №3. С.72-76
4. Сергеева А.М., Ловизин Н.С., Соснин А.А., Одинокое В.И. Исследование структуры и механических свойств металлоизделий из сплава АД0, полученных с помощью новой технологии непрерывного литья // *Перспективные материалы*. 2016. №4. С. 13–18.
5. Габидуллин Р.М., Ливанов В.А., Шипилов В.С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1977. 168 с.
6. Германн Э. Непрерывное литье: справочник. Пер. с нем. / под ред. В.И. Добаткина, В.С. Рутеса, Э.Р. Шора. М.: Металлургиздат, 1961. 814 с.
7. ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. М.: Стандартиформ, 2007. 39 с.
8. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 1975.01.01. – М.: Стандартиформ, 2006. 6 с.
9. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 2008. 24 с.
10. Аптекарь И.Л., Каменецкая Д.С. О влиянии давления на зарождение центров новой фазы // *ФММ*. 1962. Т. 14. Вып. 2. С. 316–319.
11. Бровман М.Я. Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 626 с.